

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA**



**Facoltà di Ingegneria**  
**Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni**

**TESI DI LAUREA**

**Dimensionamento e Analisi di Impatto Elettromagnetico  
di una Rete Mobile WiMAX per Applicazioni Personal  
Broadband**

Tesi svolta  
all'interno di



Relatori:

**Prof. Paolo Nepa**  
**Prof. Giuliano Manara**  
**Ing. Elena Briola**

Candidato:

**Paolo Di Filippa**

Anno accademico 2007/2008



---

# Indice

INDICE .....	I
ACRONIMI .....	IV
INTRODUZIONE .....	1
CAPITOLO 1 .....	4
1 OVERVIEW SULLE TECNOLOGIE WIMAX.....	4
1.1 Tecnologie di accesso BWA.....	4
1.2 Lo Standard 802.16.....	5
1.3 Il WiMAX Forum .....	8
1.4 Le tecnologie WiMAX .....	9
1.4.1 Profili di sistema.....	10
1.4.2 Profili di certificazione.....	11
1.4.2.1 Il Processo di Certificazione .....	12
1.4.3 Release.....	14
1.4.4 Wave.....	14
1.5 Caratteristiche Operative delle Tecnologie WiMAX .....	14
1.5.1 Tecniche di modulazione e di accesso multiplo.....	14
1.5.1.1 OFDM.....	15
1.5.1.2 OFDMA .....	16
1.5.1.3 SOFDMA.....	20
1.5.2 Il duplexing .....	21
1.5.3 Sistemi ad Antenne Multiple .....	23
1.5.3.1 Diversity Schemes .....	23
1.5.3.1.1 Space Time Coding .....	23
1.5.3.1.2 Antenna Switching.....	26
1.5.3.1.3 Maximum Ratio Combinig (MRC).....	26
1.5.3.2 Adaptive Antenna Systems .....	27
1.5.3.3 Multiple Input Multiple Output (MIMO) .....	28
1.5.3.3.1 MIMO Matrix A .....	28
1.5.3.3.2 MIMO Matrix B .....	30
1.5.3.3.3 Collaborative MIMO.....	31
1.5.4 Adaptive Modulation and Coding (AMC) .....	32
1.5.5 Fractional Frequency Reuse.....	33
1.6 Architettura di rete .....	34
1.6.1 Connectivity Service Network (CSN) .....	37
1.6.2 Access Service Network (ASN).....	38
CAPITOLO 2 .....	41
2 LO SCENARIO OPERATIVO.....	41
2.1 Il Personal Broadband.....	41

---

2.1.1	Possibilità di Business .....	42
2.1.2	Mobile WiMAX .....	43
2.2	Area di Interesse.....	46
2.3	Service Classes.....	49
2.4	Profili di servizio .....	49
2.5	La Scelta Tecnologica .....	50
2.5.1	Banda di Canale .....	51
2.5.2	Frequency Reuse.....	51
2.5.3	Antenne Multiple.....	52
2.5.4	Duplexing .....	52
2.5.5	Altre Considerazioni Generali.....	52
2.6	La Selezione degli Apparat.....	53
2.6.1	Le Base Station .....	53
2.6.2	Gli User Terminal.....	54
2.7	Analisi del Link Budget .....	55
2.8	Valutazione delle Prestazioni .....	62
2.8.1	Calcolo del Raggio Medio .....	62
2.8.2	Calcolo della Capacità Media.....	64
CAPITOLO 3.....		66
3	RF PLANNING .....	66
3.1	Approccio Preliminare.....	66
3.2	Impostazioni iniziali .....	66
3.2.1	Preprocessing dei dati .....	66
3.2.2	Tuning del Modello di Propagazione.....	68
3.3	Posizionamento dei siti.....	69
3.4	Simulazioni .....	73
3.5	Analisi dei risultati .....	74
3.5.1	Massimo Data Rate .....	74
3.5.2	Best Server .....	75
3.5.3	Probabilità di Ricezione.....	76
3.6	Prestazioni a Confronto.....	78
CAPITOLO 4.....		80
4	ANALISI DI IMPATTO ELETTRROMAGNETICO .....	80
4.1	Richiami Teorici.....	80
4.2	Normative per l'esposizione umana alle sorgenti elettromagnetiche.....	82
4.2.1	D.M. 381 98 .....	82
4.2.2	ECC/DEC/(07)02 .....	84
4.3	Valutazione del Volume di Rispetto.....	85
4.4	Analisi dei risultati .....	89

---

<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>92</b>
<b>ANNESSO A .....</b>	<b>94</b>
<b>MODELLI DI PROPAGAZIONE .....</b>	<b>94</b>
<b>Focus sui Modelli Empirici .....</b>	<b>95</b>
<b>COST 231 Hata Model .....</b>	<b>95</b>
<b>Log Normal Shadowing Model .....</b>	<b>96</b>
<b>SUI Model.....</b>	<b>97</b>
<b>ANNESSO B .....</b>	<b>99</b>
<b>WINPROP .....</b>	<b>99</b>
<b>Modelli di Path Loss supportati da WinProp.....</b>	<b>103</b>
<b>3D Intelligent Ray Tracing.....</b>	<b>103</b>
<b>Urban Dominant Path .....</b>	<b>104</b>
<b>ANNESSO C .....</b>	<b>108</b>
<b>TEA WiMAX .....</b>	<b>108</b>
<b>Market Analysis .....</b>	<b>109</b>
<b>Technical Analysis .....</b>	<b>110</b>
<b>ANNESSO D .....</b>	<b>113</b>
<b>3,5 GHZ.....</b>	<b>113</b>
<b>2,5 GHZ.....</b>	<b>117</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>120</b>

---

## **Acronimi**

## Introduzione

La sfida che il mondo delle telecomunicazioni si trova ad affrontare oggi, è quella che riguarda il problema della convergenza. La convergenza intesa come possibilità di offrire tutti i servizi, tradizionali e innovativi, con un'unica tecnologia di rete.

È a questo scopo che si sviluppa il concetto di Personal Broadband: consentire agli utenti di accedere ai servizi offerti in qualsiasi momento e soprattutto dovunque essi si trovino e con diversi dispositivi che sfruttano la stessa tecnologia.

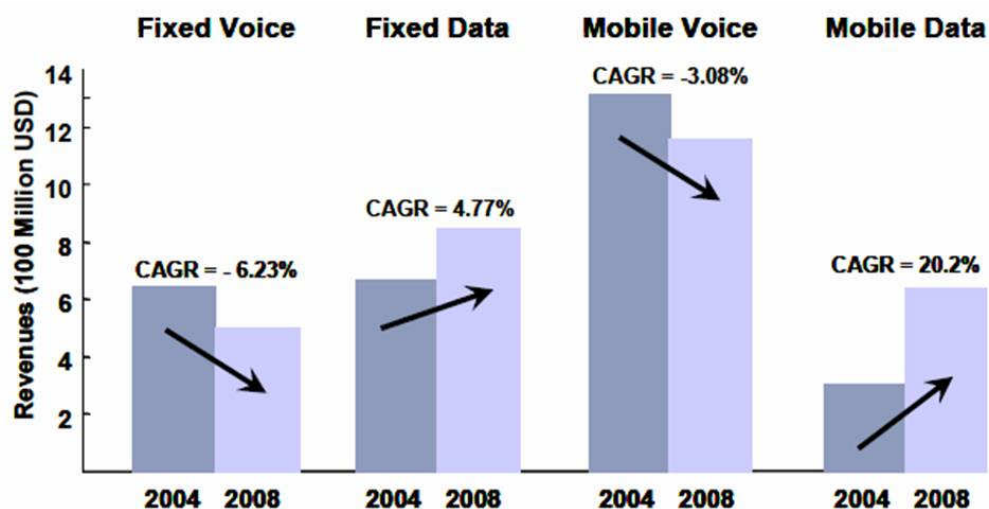
Ma qual è il nesso tra convergenza e Personal Broadband?

È l'idea di poter fondere nella stessa tecnologia di rete i servizi broadband, a cui finora si accedeva da casa, dall'ufficio, in aeroporto e in altri spazi pubblici, con la comodità offerta dalla mobilità. In particolare si può indirizzare il discorso su servizi come Mobile Internet, che sorge come ultima tipologia di servizi mobili. All'utente finale viene offerta libertà di movimento, immediatezza, semplicità di utilizzo. Come risultato di questa fusione dei due mercati più esplosivi che probabilmente si siano mai visti, la dimensione del mercato a cui può ambire il Personal Broadband sarà determinata essenzialmente da quattro tipologie di utenti:

- Gli utenti che migrano dai servizi di rete mobile perchè necessitano di maggiori velocità trasmissive necessarie per applicazioni aggiuntive;
- Gli utenti di rete fissa alla ricerca della mobilità;
- Gli utenti Wi-Fi che cercano una ulteriore gamma di servizi;
- I nuovi utenti che desiderano usufruire delle molteplici applicazioni offerte dal Personal Broadband.

Al giorno d'oggi la disponibilità di servizi è ancora limitata, e pochi utenti hanno la possibilità di sperimentare davvero la banda larga avendo a disposizione throughput superiori a 1 Mbps; inoltre i costi legati ai servizi sono ancora molto elevati. In prospettiva però anche grazie all'ottima penetrazione di mercato che hanno avuto e stanno avendo tuttora dispositivi come PDA, notebook e altri apparati portatili, è facile intuire che non passerà molto tempo prima che molti

utenti adottino servizi PB come appunto Mobile Internet. Infatti basta osservare che in molti paesi sviluppati, gli introiti dovuti al Mobile Data Traffic sono in continua crescita, al contrario di quanto avviene per quelli relativi al traffico voce [3], come mostra la Figura 1:



**Figura 1 – Introiti relativi al traffico voce e al traffico dati in Korea nel quadriennio 2004-2008**  
source: KISDI

La tecnologia che meglio si presta a realizzare uno scenario applicativo di tipo Personal Broadband sia per utenti fissi che per utenti mobili, è il Mobile WiMAX grazie alla sua elevata efficienza spettrale, alla sua ampia canalizzazione e alle innovative tecnologie d'antenna utilizzate (MIMO e beamforming) e che saranno descritte successivamente.

L'argomento di questa tesi sarà il progetto di una rete capace di fornire servizi Personal Broadband sul territorio del comune di Pisa. Viene anche eseguita l'analisi di impatto elettromagnetico, al fine di verificare che siano rispettati i limiti relativi all'emissione dei campi elettromagnetici.

La tesi si articola in cinque capitoli.

Nel primo capitolo è contenuta una panoramica della tecnologia WiMAX con riferimento all'architettura di rete. Più in dettaglio verrà descritto il livello fisico del Mobile WiMAX e le differenze con lo standard 802.16e del 2005 sancito dall'IEEE.

Nel secondo capitolo vengono definiti gli scenari applicativi e le assunzioni fatte ai fini della realizzazione del progetto. Viene descritta la distribuzione della



popolazione su tutto il territorio considerato, gli scenari di servizio, le classi d'utenza, i profili di servizio. Dopo aver scelto i parametri di configurazione delle BS si passa al calcolo del raggio massimo di copertura delle singole BS e al posizionamento delle stesse. Infine viene eseguito il link budget, definendo i margini di fading e il modello di path loss.

Il terzo capitolo entra nel dettaglio del progetto definendo il posizionamento ottimale e i criteri di dimensionamento delle Base Station (BS) al fine di rispettare i requisiti di copertura e di capacità prefissati. Vengono inoltre descritte le simulazioni di traffico effettuate sulla rete mediante il software WinPROP di AWE.

Il quarto capitolo descrive l'analisi di impatto elettromagnetico volta a verificare il rispetto dei limiti imposti dal D.P.C.M. dell'8 luglio del 2003. Le misure di campo elettrico sono effettuate sia in prossimità delle BS, sia in prossimità delle CPE (Customer Provided Equipment). Si esegue l'AIE mediante l'ausilio di Aldena NFA3D.

Il quinto ed ultimo capitolo è quello in cui si riportano le conclusioni e le considerazioni su eventuali sviluppi futuri della rete in corrispondenza dell'introduzione di nuovi servizi in scenari fissi e personal broadband.

# Capitolo 1

## 1 Overview sulle Tecnologie WiMAX

In questo capitolo si descrivono brevemente le tecnologie BWA, lo standard 802.16 e la sua evoluzione. Successivamente si fornisce una panoramica sulle tecnologie WiMAX definite dal WiMAX Forum a partire dallo standard 802.16 e le motivazioni che hanno portato alla introduzione del WiMAX.

### 1.1 Tecnologie di accesso BWA

Le applicazioni in cui possono essere impiegate le tecnologie BWA sono molteplici. Una rete con tecnologia BWA può essere utilizzata sia come rete di backhaul, per estendere la connettività broadband della backbone anche alle zone limitrofe, sia come soluzione per l'ultimo miglio, al fine di poter offrire servizi broadband a diverse classi di utenza ubicate nella zona geografica coperta.

Di seguito la classificazione secondo cui possono essere distinte le reti BWA in base alla tipologia di accesso. La distinzione riguarda la capacità della rete di supportare o meno la mobilità del terminale utente [3].

- **Fixed Broadband Wireless Access:** Il dispositivo dell'utente, che può essere una SU indoor o outdoor, si trova in posizione fissa ed è collegato allo stesso settore della BS per tutta la durata del profilo di servizio sottoscritto dall'utente. Il cambio del settore a cui è associato può avvenire solo qualora ci sia un guasto della rete o si utilizzi una macro - diversity.
- **Nomadic Broadband Wireless Access:** Il dispositivo utente, che in questo caso può essere una SU indoor o una PCMCIA card, è collegato allo stesso settore della BS o allo stesso sito per tutta la durata della connessione. Ciò significa che se il dispositivo utente si sposta e la connessione successiva avviene tramite un altro settore della stessa BS o un altro sito, il profilo sottoscritto dall'utente viene riconosciuto e l'utente può usufruire di tutti i servizi di rete previsti dal suddetto profilo.

- **Portable Broadband Wireless Access:** L'utente provvisto di un computer portatile comprensivo di PCMCIA card o di mini card può spostarsi a basse velocità (pedestri) all'interno di aree ristrette, e può usufruire regolarmente dei servizi previsti dal suo profilo. La continuità della connessione nel passaggio da un settore all'altro della stessa BS, o da una BS all'altra, è garantita dall'implementazione di una minima procedura di handoff.
- **Simple Mobile Broadband Wireless Access:** L'utente provvisto di un computer portatile comprensivo di PCMCIA card o di mini card, o di PDA (Personal Digital Assistant) o di smartphone, può spostarsi a basse velocità veicolari all'interno di un'area più estesa. Tale tipologia di accesso richiede l'implementazione di due funzionalità quali l'handoff e il power saving. La prima come nel caso dell'accesso PBWA serve a garantire la continuità di connessione per applicazioni non real-time durante lo spostamento dell'utente da una zona coperta da un settore della BS, ad una zona coperta da un altro settore della stessa BS o di un'altra BS; la funzionalità del power saving serve invece a ridurre il consumo di energia da parte del dispositivo utente qualora uno dei suoi componenti non stia funzionando, e dunque ad allungare la durata della batteria.
- **Full Mobile Broadband Wireless Access:** L'utente è equipaggiato esattamente come nel caso del SMBWA, ma in questo caso egli può spostarsi ad elevate velocità veicolari ed entro un raggio di copertura ancora più grande. Anche in questo caso è necessario l'handoff, che a differenza del caso precedente garantisce la continuità di connessione anche per applicazioni real-time mentre l'utente si sposta.

## 1.2 Lo Standard 802.16

Lo standard 802.16 è stato pensato e ottimizzato per configurazioni di rete Punto-Multipunto, in cui parecchie Subscriber Stations sono gestite da un'entità centrale, ossia la Base Station. Un sistema basato su questo standard supporta trasmissioni frame-based, in cui il frame trasmesso può assumere lunghezza variabile.

Lo standard consiste delle specifiche per il livello PHY e il livello MAC.

Il livello MAC implementa lo scheduling, che può essere centralizzato o distribuito, del controllo di accesso al mezzo, prevenendo così eventuali collisioni tra i vari subscribers connessi alla stessa BS. Il livello MAC gestisce inoltre la funzionalità di QoS sul link wireless tra BS e SS attraverso l'assegnazione dinamica delle risorse frequenziali e un meccanismo di gestione delle priorità di traffico. Il supporto di interfacce multiple verso la core network e le varie versioni del livello fisico, così come anche la sincronizzazione e i meccanismi dedicati alla sicurezza costituiscono ulteriori funzionalità chiave del livello MAC.

Lo scopo principale del livello PHY è specificamente quello di processare il flusso di bit di informazione pura al fine di minimizzare gli errori al ricevitore. Inoltre per garantire gli elevati livelli di prestazioni richiesti per supportare i vari servizi su link wireless a banda larga, il livello fisico definisce anche modulazioni avanzate, equalizzazione, multiplexing, schemi di diversità e schemi di controllo degli errori. Il livello PHY si distingue a seconda delle successive versioni dello standard 802.16 sancite dall'IEEE [2],[3].

La prima versione dello standard, la 802.16, è quella definita nel 2001, e realizzata per applicazioni Fixed BWA in scenari LOS nella banda frequenziale compresa tra gli 10 GHz e i 66 GHz. Poiché operare in scenari di applicazioni esclusivamente caratterizzati dal LOS rappresenta di fatto una limitazione ai fini dell'espansione di una tecnologia per le telecomunicazioni, nel 2004 è stata definita la versione dello standard IEEE 802.16-2004, operante nella banda dei 2-11 GHz, in scenari LOS e NLOS. Essa è stata pensata per consentire l'accesso fisso e nomadico, introducendo anche la possibilità di realizzare collegamenti in cui non è presente la linea di visibilità diretta tra antenna trasmittente e antenna ricevente sfruttando i benefici introdotti dalla modulazione OFDMA.

Infine è stata definita la versione 802.16e del 2005, la quale opera nella banda compresa tra i 2 GHz e i 6 GHz. Essa consente l'accesso portatile e mobile in scenari LOS e NLOS, e una migliore ripartizione delle risorse grazie all'introduzione della modulazione Scalable OFDMA [1],[2] .

In Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche delle versioni 802.16-2004 e 802.16e:

	802.16 - 2004	802.16e
Approvato	Giugno 2004	Dicembre 2005
Banda	2 - 11 GHz	2 - 11 GHz per l'accesso fisso 2 - 6 GHz per l'accesso mobile
Scenario operativo	LOS/NLOS	LOS/NLOS
Velocità di trasmissione	75 Mbps in 20 MHz	75 Mbps in 20 MHz per l'accesso fisso 15 Mbps in 5 MHz per l'accesso mobile
Tecnica di trasmissione	OFDM (256 sottoportanti) OFDMA (2048 sottoportanti)	OFDM, OFDMA, SOFDMA
Accesso multiplo	TDMA, OFDMA	TDMA, SOFDMA
Formato del duplexing	TDD/FDD	TDD/FDD
Ampiezza della banda di canale	Variabile tra 1.25 MHz e 20 MHz	Variabile tra 1.25 MHz e 20 MHz
Efficienza spettrale	3.75 bps/Hz in 20 MHz	3.75 bps/Hz
Compatibilità con 802.16 - 2004		No se si usa la modulazione SOFDMA

Tabella 1 - Principali caratteristiche delle tecnologie 802.16

La versione 802.16-2004 dello standard, su cui poi è stata sviluppata la tecnologia Fixed WiMAX, è nata principalmente con lo scopo di fornire la connettività broadband, dunque i servizi DSL, e servizi di nuova concezione, come ad esempio VoIP e video-streaming, a tutti quegli utenti posizionati in zone non raggiunte dalle linee via cavo. Laddove invece i servizi su cavo erano già presenti, lo standard 802.16-2004 si proponeva come valida alternativa specie sul piano dei benefici economici.

A parte le differenze sul piano PHY deducibili dalla Tabella 1, lo standard 802.16e a partire dal quale è stato sviluppato il Mobile WiMAX si differenzia dalla precedente versione proprio perché offre il supporto della mobilità del terminale utente.

La funzione che forse più di tutte sta alla base di tale peculiarità è chiaramente l'**handover** che consente ad un terminale mobile, quale può essere un pc portatile con una scheda PCMCIA, di spostarsi lungo un certo percorso e di passare dunque dalla gestione di una BS a quella di un'altra senza interrompere la connessione. Il discorso è analogo a quello che succede nelle attuali reti di terza generazione quando un terminale utente, si sposta da una cella all'altra o da un settore all'altro.

Il processo di handover viene gestito a livello MAC attraverso procedure e messaggi di management specifici.

Esistono varie modalità di handover e in ogni caso il processo coinvolge la comunicazione tra BS, che avviene a livelli protocollari superiori (Mobility Framework).

### 1.3 Il WiMAX Forum

Il WiMAX Forum è un'organizzazione senza scopo di lucro, fondata nel Giugno del 2001, e che attualmente conta più di 522 membri tra cui Alcatel, Alvarion, Cisco System, Siemens Mobile, Telecom Italia, e la stessa Witech.

La mission del WiMAX Forum è quella di consentire l'adozione globale del WiMAX, con particolare attenzione a quei processi di certificazione che garantiscono l'interoperabilità degli apparati di diversi produttori. Dunque, lo standard 802.16 stabilisce le funzionalità a livello PHY e MAC relativamente all'accesso, ovvero alla sola comunicazione tra BS e SS, mentre il WiMAX Forum seleziona una parte delle specifiche definite nello standard e le estende alla rete End-to-End, definendo inoltre un Network Reference Model che in seguito verrà descritto.

Il WiMAX Forum consta attualmente di 9 gruppi di lavoro, ognuno dei quali adibito ad un diverso aspetto della tecnologia:

- **Application Working Group:** Identifica e promuove le applicazioni più adatte alla tecnologia WiMAX e sviluppa le soluzioni pratiche più idonee a tali applicazioni;
- **Certification Working Group:** Gestisce i programmi di certificazione e le relazioni con i laboratori di test;
- **Evolutionary Technical Working Group:** Supporta gli esistenti profili OFDM, sviluppa ulteriori profili OFDM fissi, e sancisce specifiche tecniche per l'evoluzione di reti basate su OFDM verso tecnologie nomadi, portatili e mobili;
- **Global Roaming Working Group:** Garantisce la disponibilità di servizi global roaming per le reti WiMAX con una tempistica opportuna relativamente alla domanda di mercato;

- **Marketing Working Group:** Promuove il WiMAX Forum, le sue linee guida e i suoi standards che costituiscono la base per l'interoperabilità globale dei sistemi BWA;
- **Network Working Group:** Crea le specifiche di networking ad alto livello per le tecnologie di accesso fisso, nomade, portatile e mobile del WiMAX, al di là degli scopi definiti dallo standard 802.16;
- **Regulatory Working Group:** Interagisce con gli enti regolatori delle telecomunicazioni, con le istituzioni locali e mondiali per l'allocazione dello spettro per le applicazioni WiMAX;
- **Service Provider Working Group:** Fornisce ai service providers e ai vendors una piattaforma su cui essi possano confrontarsi in tema di prodotti e requisiti spettrali, con lo scopo di soddisfare i propri obiettivi di mercato;
- **Technical Working Group:** Lo scopo del TWG è quello di definire le specifiche per i prodotti, e di stabilire i processi di certificazione per le interfacce radio basate su OFDMA, principalmente con lo scopo di soddisfare i requisiti di interoperabilità per le Mobile Stations, Subscriber Stations e Base Stations in conformità con i dettami dello standard 802.16.

### 1.4 Le tecnologie WiMAX

Come precedentemente affermato le tecnologie WiMAX, definite dal WiMAX Forum, possono essere considerate a tutti gli effetti, un sottoinsieme delle tecnologie facenti capo allo standard 802.16 sancito dall'IEEE, in quanto implementano solo alcune funzionalità di queste ultime, al fine di garantire l'interoperabilità tra gli apparati di differenti produttori. Le tecnologie WiMAX dunque sono tecnologie di accesso a banda larga in scenari applicativi, fissi, nomadici, portatili e mobili.

Uno dei principali vantaggi grazie al quale le tecnologie WiMAX si stanno imponendo nel panorama delle reti BWA è quello dovuto alle migliori prestazioni e alla maggiore flessibilità nel deployment dell'infrastruttura di rete.

Gli step evolutivi delle tecnologie WiMAX sono andati di pari passo con la definizione da parte dell'IEEE delle varie revisioni dello standard 802.16 di cui si seguita a presentare una rapida elencazione.

Il WiMAX Forum definisce i requisiti che un prodotto deve rispettare per poter ricevere la certificazione che garantisce l'interoperabilità. Tali requisiti sono suddivisi in base a: profili di sistema, profili di certificazione, release.

### 1.4.1 Profili di sistema

I profili di sistema definiscono una versione di WiMAX in base a cinque parametri del livello MAC e dell'alto livello PHY. Tali parametri sono *frequenza di trasmissione, banda di canale, modalità di duplexing, point to multipoint MAC e MAC*.

Dunque i profili di sistema non considerano tutti i possibili parametri operativi, ma danno maggior priorità a quei parametri che sono largamente supportati dalle industrie e a quei parametri che consentono di rispettare le normative e le regolamentazioni per le frequenze nei vari paesi.

Ad oggi esistono tre profili di sistema, Fixed WiMAX basato sulla versione dello standard IEEE 802.16d-2004, Mobile WiMAX ed Evolutionary WiMAX basati entrambi sulla versione 802.16e-2005 dello standard IEEE. Nella tabella seguente si riportano in dettaglio le differenze tra i tre profili di sistema citati.

	Fixed WiMAX	Evolutionary WiMAX	Mobile WiMAX	
Standard	802.16d - 2004	802.16e - 2005	802.16e - 2005	
Multiplexing	OFDM	OFDM	OFDMA	
FFT Size	256	256	512, 1024	
Duplexing	TDD, FDD, HFDD	TDD, FDD, HFDD	TDD	
Modulation	BPSK, QPSK, 16QAM, 64 QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64 QAM (OPZIONALE)	BPSK, QPSK, 16QAM, 64 QAM (OPZIONALE IN UPLINK)	
Power Classes	0 - 14 dBm	0 - 14 dBm	16 QAM	QPSK
	14 - 17 dBm	14 - 17 dBm	18 - 21 dBm	20 - 23 dBm
	17 - 20 dBm	17 - 20 dBm	21 - 25 dBm	23 - 27 dBm
	20 - 23 dBm	20 - 23 dBm	25 - 30 dBm	27 - 30 dBm
	over 23 dBm	over 23 dBm	over 30 dBm	over 30 dBm

**Tabella 2 – Profili di Sistema**

source: WiMAX forum



### 1.4.2 Profili di certificazione

È sottoinsieme di caratteristiche di un profilo di sistema che specifica le frequenze supportate, la canalizzazione e il formato del duplexing (ad esempio 3.5 GHz, 5 MHz, TDD) per ogni frequenza utilizzabile. Solo i prodotti che appartengono allo stesso profilo di certificazione possono interoperare tra loro.

È stato definito dal WiMAX Forum un processo di certificazione per assicurare che un apparato sia conforme alle specifiche dei test. Quegli apparati che rispettano pienamente i requisiti di ciascun profilo e che dunque possono interoperare tra loro, vengono dunque riconosciuti con l'etichetta "WiMAX Forum Certified<sup>TM</sup>".

I profili di certificazione relativi alle due principali versioni del WiMAX, sono raccolti nella Tabella 3:

System Profiles	Banda	Formato del Duplexing	Canale
<b>Fixed WiMAX</b> (IEEE 802.16 - 2004, OFDM)	3,4 - 3,6 GHz	TDD	3,5 MHz
	3,4 - 3,6 GHz	TDD	7 MHz
	3,4 - 3,6 GHz	FDD	3,5 MHz
	3,4 - 3,6 GHz	FDD	7 MHz
	5,725 - 5,850 GHz	TDD	10 MHz
<b>Mobile WiMAX</b> (IEEE 802.16e, OFDMA)	2,3 - 2,4 GHz	TDD	5, 10 MHz
	2,3 - 2,4 GHz	TDD	8,75 MHz
	2,496 - 2,690 GHz	TDD	5, 10 MHz
	3,4 - 3,6 GHz	TDD	5 MHz
	3,4 - 3,6 GHz	TDD	7 MHz

Tabella 3 –Profili di certificazione relativi alla versione 802.16 – 2004

### 1.4.2.1 Il Processo di Certificazione

Descriviamo brevemente l'iter per la certificazione dei prodotti WiMAX.

I requisiti di testing per gli apparati WiMAX sono definiti dai profili di sistema e dai profili di certificazione.

Due sono le tipologie di test del processo di certificazione: test di conformità volti alla validazione di un dispositivo secondo le specifiche dello standard 802.16e selezionate dal WiMAX Forum, ossia le specifiche relative al livello MAC e a livello PHY. L'altra tipologia di test è quella relativa alla interoperabilità, mediante la quale si vuole garantire che il dispositivo è in grado di interoperare appunto con prodotti di altri costruttori secondo un fissato profilo di certificazione.

Dunque, per un produttore che voglia ottenere la certificazione per un suo prodotto, è consigliato eseguire autonomamente dei test di verifica prima di affrontare il processo di certificazione. Inoltre esistono delle sessioni di test informali (plugfest) in cui è possibile sottoporre un dispositivo a una serie di test analoghi a quelli ufficiali e in cui si può quindi verificare effettivamente l'interoperabilità del dispositivo.

Il processo di certificazione inizia con la scelta di un laboratorio di testing e con la selezione del profilo di certificazione per cui bisogna testare il dispositivo. Viene anche specificato se il prodotto sotto test deve essere considerato come un apparato a se stante, o come un modulo aggiuntivo per un dispositivo multiplo, o altrimenti come una versione aggiornata di un prodotto precedentemente certificato, o ancora come un prodotto con un modulo già certificato WiMAX.

A questo punto il produttore sottopone preliminarmente il proprio prodotto al Protocol Implementation Conformance Statement (PICS) il cui obiettivo è quello di stabilire se il prodotto è in grado di supportare tutti i test del processo di certificazione e se il prodotto rispetta tutti i requisiti del processo di certificazione. A seconda del laboratorio di testing scelto, può essere richiesto anche che il dispositivo sia sottoposto ad un Protocol Implementation eXtra Information for Testing (PIXIT) che fornisce informazioni circa la configurazione e altre caratteristiche dell'apparato.

Il WiMAX Forum ha individuato, per il processo di certificazione vero e proprio, fino a sei moduli di testing, volti a verificare la conformità agli standard, le prestazioni, l'interoperabilità, la conformità alla rete, e l'interoperabilità di rete. Se anche uno solo di questi test fallisce il processo viene interrotto e viene chiesto al produttore di eseguire le modifiche necessarie. Una volta eseguite tali modifiche il processo può ripartire. Qualora tutti i test vengano superati viene rilasciato un attestato di certificazione e il prodotto viene iscritto nel WiMAX Forum Certified Product Registry il quale è liberamente consultabile sul sito web del WiMAX Forum.

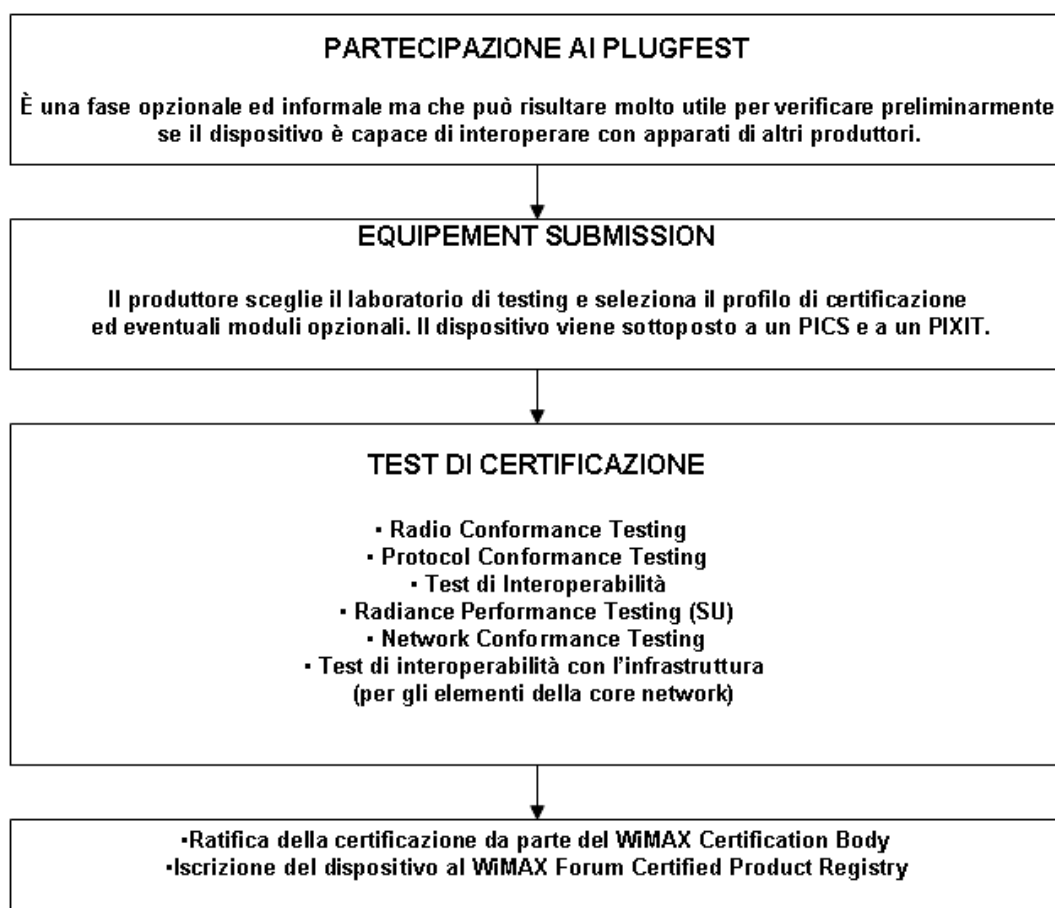


Figura 2 – Processo di certificazione WiMAX

source: SenzaFili Consulting

Tutte le prove vanno ripetute per ognuno dei profili di certificazione indicati dal produttore del dispositivo da certificare.

### 1.4.3 Release

Una release è una versione delle specifiche tecniche a cui appartiene un profilo di sistema o di certificazione.

### 1.4.4 Wave

L'insieme dei test del processo di certificazione è stato suddiviso in due step: la certificazione Wave 1, principalmente rivolta alle funzionalità delle stazioni fisse e la certificazione Wave 2 che invece è principalmente rivolta alle funzionalità delle stazioni mobili. In particolare Wave 1 certifica quei prodotti che sono già disponibili e i test rivolti a tale certificazione non richiedono l'utilizzo delle tecniche MIMO, mentre Wave 2 è rivolto a quei dispositivi che verranno utilizzati in modalità mobile; i requisiti per tali dispositivi riguardano la capacità di supportare tecniche avanzate come MIMO e Beamforming e modalità di funzionamento come lo stato idle o lo stato sleep. In pratica una Wave specifica una gerarchia progressiva di insiemi di funzionalità minime, per un certo profilo di certificazione ed una certa release, che un apparato deve implementare. Ogni wave è retrocompatibile con le precedenti e aggiunge nuovi sottoinsiemi di funzionalità previste dallo stesso profilo di certificazione.

## 1.5 Caratteristiche Operative delle Tecnologie WiMAX

In questo paragrafo vengono descritte le principali caratteristiche del livello fisico delle tecnologie WiMAX, quindi modulazione, accesso multiplo, formato del duplexing, metodi per il dimensionamento dei canali frequenziali, le tecniche di diversità e i sistemi ad antenne multiple.

### 1.5.1 Tecniche di modulazione e di accesso multiplo

Le tecniche di modulazione utilizzate dalle due versioni, Fixed e Mobile, del WiMAX sono rispettivamente l'OFDM e l'OFDMA.

### 1.5.1.1 OFDM

L'acronimo OFDM sta per Orthogonal Frequency Division Multiplexing e il relativo segnale è costituito da più sottoportanti ortogonali appunto, cioè tali per cui l'interferenza reciproca è nulla, ognuna delle quali può essere modulata indipendentemente dalle altre con modulazioni BPSK, QPSK, 16QAM o 64QAM su entrambe le tratte (UL e DL). In particolare la modulazione BPSK viene utilizzata per la trasmissione del preambolo della trama e dei codici di ranging.

In un segnale OFDM un flusso di simboli a velocità estremamente elevata viene suddiviso dunque in più flussi di dati paralleli a basso rate. Ogni sottoflusso viene trasmesso su una certa frequenza sottoportante e modulato. Dunque ciò che avviene con una modulazione OFDM consiste nella suddivisione del contenuto informativo di un segnale a banda larga su più canali frequenziali contigui a banda stretta che risentono molto meno del fading variabile del canale di trasmissione.

Oltre alle sottoportanti su cui vengono trasmessi i dati dell'utente, sono presenti anche delle sottoportanti pilota e delle sottoportanti virtuali. Le prime hanno lo scopo di stimare l'andamento della risposta del canale in modo da poterne compensare gli effetti al ricevitore e a tal fine trasportano un set di simboli noti sia al trasmettitore che al ricevitore, mentre le sottoportanti virtuali sono nulle al fine di ridurre l'interferenza con gli spettri dei segnali adiacenti. Infatti lo spettro del segnale OFDM non è rigorosamente limitato in banda, e possiede delle code che vanno a fuori dalla banda del segnale. Tali code non sono trascurabili e rischiano di provocare interferenza con gli spettri dei segnali adiacenti. Per evitare questo problema si fa in modo di non fornire simboli ad alcune sottoportanti di fatto azzerandole. Tali sottoportanti sono proprio le sottoportanti virtuali.



Figura 3 – OFDM

source: Intel Corporation

Dunque i simboli corrispondenti a ciascuna sottoportante sono più lunghi rispetto al simbolo di partenza appartenente al flusso ad elevato rate.

L'OFDM è basata su un diverso concetto di diversità, grazie al quale è possibile combattere il fading di canali selettivi ma che non necessita dell'utilizzo di complessi equalizzatori richiesti comunemente dalle tecniche del CDMA e del TDMA. Il vantaggio dell'OFDM è che per sua natura realizza diversità in frequenza grazie alla quale anche se qualche dato giunge con degli errori al ricevitore a causa della selettività del canale su determinate sottoportanti, e spesso possibile ricostruire l'intero pacchetto informativo utilizzando i dati trasmessi sulle altre sottoportanti e applicando un fattore di correzione.

Inoltre l'OFDM rende possibile l'utilizzo di altre tecniche di diversità per ottenere un'ulteriore compensazione del margine di fading. Sono supportate infatti la diversità spaziale ottenuta mediante l'ausilio di antenne multiple, la diversità temporale mediante ripetizione del dato informativo trasmesso, e lo Space-Time Coding (STC), che è una combinazione di diversità spaziale e temporale.

Quindi grazie alla modulazione OFDM è possibile ottenere prestazioni migliori in uno scenario NLOS in cui non è disponibile la visibilità diretta tra trasmettitore e ricevitore.

### **1.5.1.2 OFDMA**

L'OFDMA a differenza dell'OFDM è una tecnica di accesso multiplo realizzata a partire dalla modulazione OFDM. Risulta allora evidente già dall'acronimo la differenza sostanziale tra OFDM e OFDMA: mentre l'OFDM consente di trasmettere sul canale ad un solo utente, l'OFDMA ripartisce la risorsa, in questo caso al banda, consentendo così a più utenti di trasmettere sullo stesso canale. In particolare a ciascun utente viene fornito un certo numero di sottoportanti. Il gruppo di sottoportanti assegnate ad un determinato utente costituisce un sottocanale e le sottoportanti di un determinato sottocanale possono anche non essere adiacenti sulla banda complessiva. Può succedere ad esempio che in downlink un sottocanale possa essere ricevuto da più ricevitori, mentre in uplink ad un certo trasmettitore possono essere assegnati più sottocanali.

Codifica modulazione e ampiezza possono essere impostate separatamente per ciascun sottocanale a seconda delle condizioni del link di radiopropagazione.

L'allocazione delle risorse viene fatta variare nel tempo e può essere gestita in base alle necessità dell'utente e alla qualità del canale.

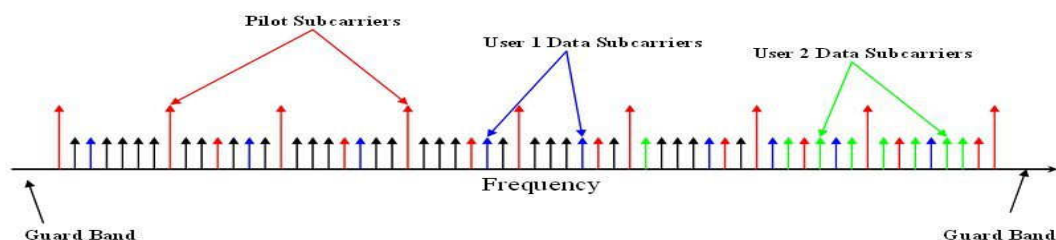


Figura 4 – OFDMA

source: Intel Corporation

Dunque l'OFDMA offre molti vantaggi per applicazioni in scenari nomadici e mobili.

Esistono due metodi per assegnare le sottoportanti ai sottocanali:

- Allocazione distribuita delle sottoportanti
- Allocazione adiacente delle sottoportanti

Nel primo approccio ad un sottocanale possono essere assegnate le sottoportanti anche se esse non sono adiacenti, ovvero anche se sono distribuite casualmente sullo spettro complessivo. Con questo approccio viene massimizzata la diversità in frequenza e viene mediata l'interferenza esistente tra le varie celle. Questo tipo di approccio è il migliore per applicazioni mobili e portatili, in cui cioè le condizioni del canale variano abbastanza rapidamente.

Nell'allocazione adiacente delle sottoportanti invece un certo sottocanale utilizza sottoportanti adiacenti che possono essere selezionate in maniera adattativa mediante uno scheduler (vengono selezionate le sottoportanti con un SNIR (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio) più elevato, mentre le sottoportanti che presentano un profondo fading vengono scartate.)

Questo secondo tipo di approccio richiede che il canale vari lentamente e dunque risulta maggiormente indicato per scenari fissi o al più nomadici.

Esistono diversi schemi di permutazioni utilizzati dall'OFDMA per poter implementare entrambi gli approcci descritti.

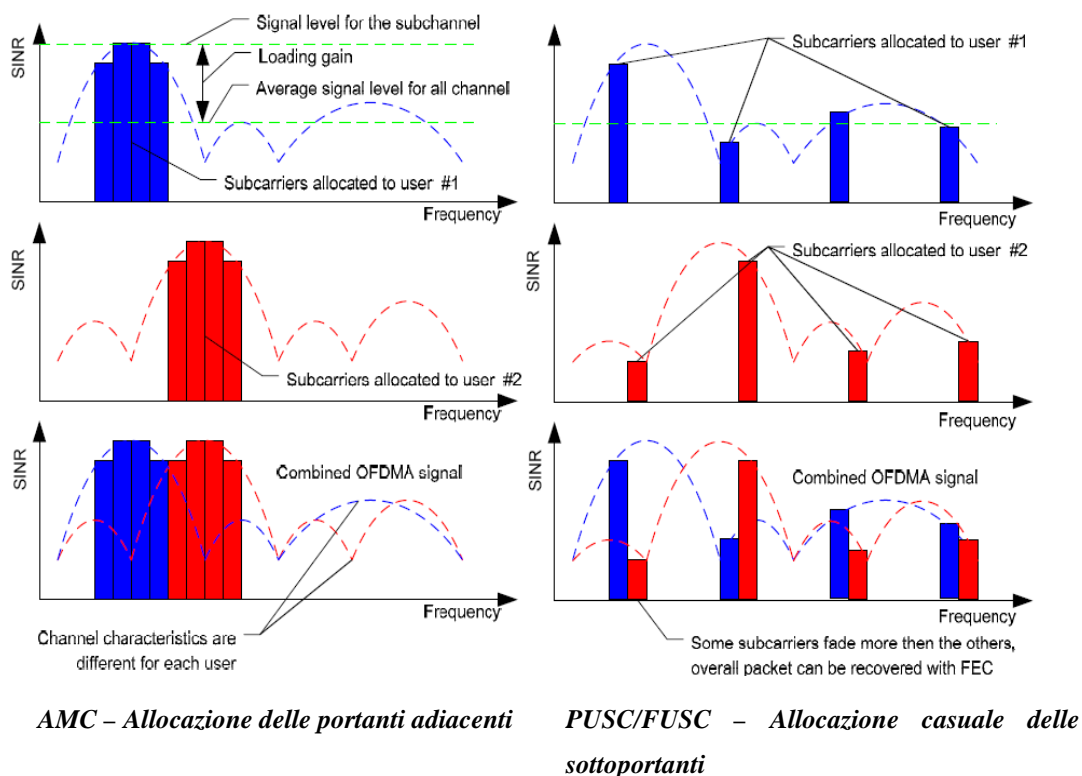
- PUSC : Partial Usage of SubCarriers

- FUSC : Full Usage of SubCarriers
- AMC : Adaptive Modulation and Coding

I primi due sono schemi di permutazione sfruttano i vantaggi della distribuzione casuale delle sottoportanti e sono dunque implementati per le applicazioni mobili in cui gli utenti si spostano rapidamente.

AMC invece utilizza l'allocazione adiacente delle sottoportanti che massimizza l'efficienza per gli utenti fissi/nomadici. Il connubio tra questo schema di permutazione e la tecnica del beamforming AAS consente di ottenere un guadagno in termini di link budget, che implica di poter estendere la copertura oppure di aumentare il throughput a parità di copertura in quanto viene fornito un segnale più forte [2].

In Figura 5 sono riportati gli schemi di permutazione descritti.



**Figura 5 – Schemi di permutazione e allocazione delle sottoportanti**      source: Intel Corporation

Nella tecnologia WiMAX sono implementati gli schemi PUSC e AMC.

Grazie alla sottocanalizzazione è possibile ottenere un significativo guadagno in uplink. Ad esempio si supponga di suddividere le sottoportanti in 16 sottocanali, e si assuma che ad un utente sia assegnato un certo sottocanale. Tale utente



concentrerà tutta la sua potenza trasmessa su quel fissato sottocanale e dunque la potenza trasmessa su ciascuna sottoportante di quel sottocanale subirà un guadagno pari a  $10 \cdot \log_{10}(16) = 12$  dB [2].

L'OFDMA dunque consente di inoltrare i pacchetti sia in frequenza (sottocanali) sia nel tempo (simboli). Questo fornisce una maggiore flessibilità che porta ad una maggiore granularità nell'allocazione delle risorse rispetto ad un sistema che lavora in TDM (OFDM). La possibilità di agire su più grandezze, e dunque un numero più elevato di gradi di libertà, portano ad un aumento della qualità del servizio (QoS) e dell'efficienza spettrale.

Dunque se nell'OFDM ogni sottoportante corrisponde ad un flusso di simboli relativi ad un unico flusso di dati d'utente, nell'OFDMA non è così poiché si affacciano più sottoportanti relative ognuna a un diverso utente andando a costituire un sottocanale frequenziale.

I vantaggi offerti dall'OFDMA rispetto alla semplice OFDM sono evidenti negli scenari multicellulari. In tali scenari l'OFDM necessita di antenne particolarmente direttive e di un elevato fattore di riutilizzo delle frequenze per riuscire a contrastare gli effetti dell'interferenza inter-cella. Inoltre anche la pianificazione RF della rete diventa impegnativa. L'utilizzo dell'OFDMA negli scenari multicellulari porta ad incrementare le prestazioni della rete, poiché grazie agli schemi di permutazione delle sottoportanti (PUSC e FUSC) l'interferenza inter-cella viene mediata su tutte le celle e diventa così una funzione del carico della cella. Inoltre i sistemi OFDMA sono molto più flessibili in termini di pianificazione RF e supportano diversi schemi di riuso delle frequenze.

In particolare gli schemi di riuso più utilizzati, poiché più performanti, sono due: 1x3x1 e 1x3x3. Entrambi gli schemi sono implementati sulle BS costituite da tre settori e richiedono solo un canale RF per tutti i settori.

Lo schema 1x3x1 utilizza un fattore di riuso pari a 1, è detto schema di riuso universale e utilizza lo stesso canale per ciascuno dei tre settori della BS.

Il vantaggio principale di questo schema consiste nell'utilizzare una porzione minima dello spettro, e dunque questo diventa fondamentale quando lo spettro complessivo disponibile è limitato.

Il fattore di riuso pari a 1 prevede l'utilizzo congiunto di uno schema di permutazione pseudocasuale delle sottoportanti unitamente alla segmentazione del canale, al fine di attenuare l'effetto dell'interferenza co-canale (Co-Channel Interference) ai bordi di ciascun settore e di ciascuna cella. Il risultato è che parte della capacità di canale in downlink è sacrificata poiché alcune sottoportanti non sono pienamente sfruttate su tutta la cella. Nonostante questo l'efficienza spettrale in downlink del WiMAX con il riutilizzo universale delle frequenze è comunque elevata e generalmente questo fa preferire lo schema 1x3x1 allo schema 1x3x3.

Lo schema di riuso 1x3x3 prevede che ad ogni settore della BS sia assegnato un differente canale. Così a parità di larghezza di banda di canale, una BS con tre settori richiede uno spettro 3 volte più grande rispetto al caso con il fattore di riuso universale. Lo schema 1x3x3 consente di eliminare l'interferenza co-canale ai bordi dei settori e di ridurla significativamente tra le celle vicine grazie anche ad una separazione spaziale più ampia tra i canali che operano sulle stesse frequenze. L'interferenza di canale adiacente (Adjacent Channel Interference) ai bordi di ciascun settore è controllata dal fatto che le sottoportanti sono ortogonali e dunque grazie alla natura stessa dell'OFDMA.

Con questo schema di permutazione dunque le varie sottoportanti sono maggiormente sfruttate e dunque l'efficienza spettrale di ciascun canale viene incrementata ma richiede uno spettro tre volte più grande.

In generale l'incremento dell'efficienza spettrale che si ottiene non è tale da poter compensare la spesa per l'acquisto di uno spettro tre volte superiore a quello che serve nel caso del riuso universale. Dunque in linea di massima il riuso universale delle frequenze, cioè lo schema di permutazione con un fattore di riuso pari a 1, è da preferire, nel caso di reti WiMAX, a quello con un fattore di riuso pari a 3.

### 1.5.1.3 SOFDMA

Nel disegnare un sistema che lavora con modulazione OFDMA è necessario fare attenzione al numero di sottoportanti che si assegnano a ciascun sottocanale poiché questo va ad influire su diversi aspetti prestazionali della rete. Come succede in questi casi una determinata scelta può portare ad avere dei vantaggi su determinati aspetti, ma comporta degli svantaggi sotto altro punti di vista.

Infatti ad esempio, aumentare il numero di sottoportanti per ciascun sottocanale considerato sicuramente garantisce una migliore immunità all'Interferenza Inter Simbolica (ISI) causata dal multipath, ma di contro implica una maggiore complessità del signal processing. Inoltre avere un numero più elevato di sottoportanti implica una maggior sensibilità all'effetto Doppler e al rumore di fase. Studi in questo senso hanno dimostrato che un ottimo tradeoff per sistemi mobili, è ottenuto quando la spaziatura tra le sottoportanti è pari a 11 KHz.

La differenza sostanziale tra la tecnica di accesso OFDMA e la Scalable OFDMA consiste nel fatto che in quest'ultima la dimensione della FFT, e dunque il numero di sottoportanti assegnate a ciascun sottocanale, non è fisso come nel caso dell'OFDMA ma può variare in base all'ampiezza di banda del canale al fine di mantenere costante la spaziatura tra le sottoportanti.

Attualmente ci sono solo due dimensioni previste per la FFT nel WiMAX e prevedono 512 e 1024 sottoportanti.

Alcune altre caratteristiche vantaggiose supportate dalla tecnica di accesso SOFDMA sono ad esempio la capacità di utilizzare l' AMC, l'utilizzo dell' H-ARQ, le tecniche di diversità spaziale come il MIMO sia in DL che in UL e tutte le altre caratteristiche supportate dall'OFDMA [2].

### 1.5.2 Il duplexing

Lo standard 802.16e supporta sia il formato TDD(Time Division Duplexing) che il Full/Half Frequency Division Duplexing (FFDD, HFDD); la prima release dei profili di certificazione per il Mobile WiMAX supportava il solo formato TDD. Le attuali release invece supportano anche i vari formati a divisione di frequenza (FDD), in modo da poter soddisfare specifici mercati in cui il TDD è vietato dalle vigenti regolamentazioni dello spettro, oppure è solo più conveniente utilizzare il formato FDD[9]. In generale però il formato maggiormente utilizzato è il TDD per svariate motivazioni:

- Il TDD è più flessibile, poiché consente di calibrare il DL/UL ratio per poter supportare in maniera efficiente il traffico asimmetrico tra downlink

e uplink, mentre ciò con l’FDD non può essere fatto perché downlink e uplink hanno dimensioni di canale fissate.

- Il TDD garantisce la reciprocità del canale, per meglio supportare tecnologie di antenna avanzate come MIMO o AAS;
- A differenza del FDD che richiede due canali, uno per l’uplink e uno per il downlink, il TDD necessita di un solo canale frequenziale per entrambe le direzioni di comunicazione. Questo offre una maggiore flessibilità nell’assegnazione delle risorse spettrali;
- Sia i trasmettitori che i ricevitori che comunicano sfruttando il TDD, implementano una complessità di processing minore rispetto a quei dispositivi che supportano il FDD, e questo si ripercuote anche sul costo degli apparati rappresentando un ulteriore vantaggio nell’utilizzo del TDD.

In particolare il TDD assicura la reciprocità del canale tra uplink e downlink. Questo è particolarmente importante qualora si implementi l’Adaptive Beamforming. I benefici introdotti da tale tecnica infatti dipendono dalla trasmissione sul canale in uplink dei parametri di controllo e ottimizzazione di ampiezza e fase per ciascun elemento trasmittente dell’array presente sulla base station [9]. L’FDD non fornisce prestazioni esaltanti in tal senso, a causa della variabilità esistente tra canale in uplink e canale in downlink. Questi talvolta arrivano ad essere separati da più di 100 MHz.

Un altro vantaggio offerto dal TDD è rappresentato dalla capacità di gestire condizioni di traffico asimmetrico. Mediante l’utilizzo del TDD il Mobile WiMAX è in grado di supportare valori del rapporto tra downlink e uplink che vanno da 1:1 a 3:1. Questo rappresenta un sostanziale vantaggio dal punto di vista del throughput nel caso di traffico dati in cui è previsto che il downlink sia dominante rispetto all’uplink.

### **1.5.3 Sistemi ad Antenne Multiple**

Lo standard 802.16, in tutte le sue versioni è stato concepito per lavorare principalmente in scenari NLOS, specie per quanto riguarda le applicazioni in mobilità. Dunque si tratta di scenari e condizioni operative caratterizzate da canale multipath. Le tecniche di modulazione descritte, OFDM OFDMA e SOFDMA, sono particolarmente adatte a lavorare in tali ambienti. Inoltre l'utilizzo congiunto di tali tecniche e dei sistemi multi-antenna più moderni, consente di sfruttare a proprio vantaggio il multipath incrementando le prestazioni per quanto riguarda sia la capacità, sia la copertura, sia il tasso di errore in ricezione. Le tecniche multi-antenna possono essere suddivise essenzialmente in tre categorie primarie:

- Diversity Schemes;
- AAS (Adaptive Antenna Systems);
- MIMO (Multiple Input Multiple Output);

#### **1.5.3.1 Diversity Schemes**

Le tecniche che possono essere annoverate come schemi di diversità sono tre:

- Space-Time-Coding
- Antenna Switching
- Maximum Ratio Combining (MRC)

##### **1.5.3.1.1 Space Time Coding**

La tecnica è chiamata così perché l'informazione viene trasmessa da due antenne (space) su due slot temporali consecutivi (time). Dunque l'informazione viene trasmessa sfruttando la diversità spaziale e temporale. La Figura 6 illustra ciò che avviene in trasmissione

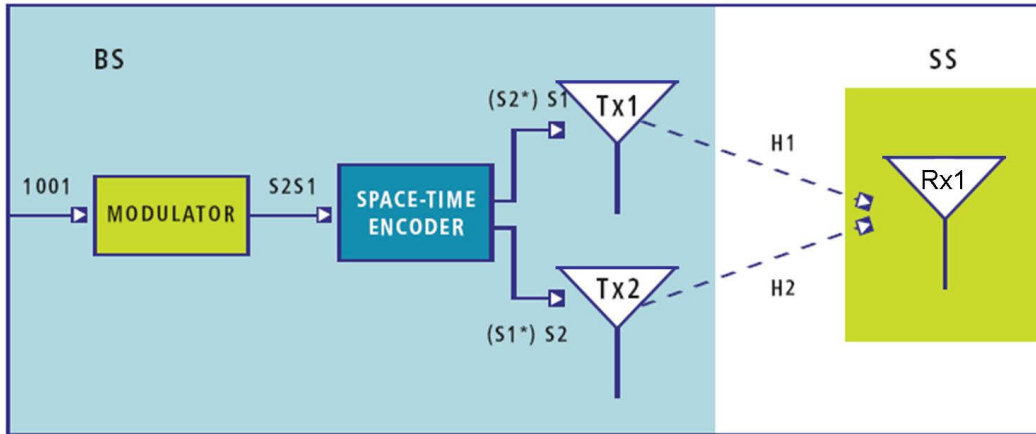


Figura 6 – Schema per la tecnica dello STC

source: Airspan

In questo esempio si è considerato il caso realistico in cui in trasmissione si hanno due antenne mentre in ricezione ve ne è una sola. Questo perché è più facile che una BS riesca a supportare in termini di spazio l'installazione di due antenne vicine, rispetto a che ciò avvenga per un dispositivo d'utente.

Questa tecnica consente di ottenere un guadagno di diversità in trasmissione. Introduciamo il concetto di *matrice di canale*  $H$ : la matrice di canale sarà costituita dai coefficienti  $h_{ij}$  che legano l'antenna trasmittente  $i$  all'antenna ricevente  $j$ . Allora nell'esempio di Figura 6 tale matrice sarà in realtà un vettore e sarà pari a:

$$H = [h_{11} \ h_{21}]$$

allora la matrice dei simboli trasmessi dalle due antenne avrà la forma seguente:

$$\begin{array}{c} \begin{bmatrix} s_1^1 & s_1^2 \\ s_2^1 & s_2^2 \end{bmatrix} \\ \xrightarrow{\text{Time}} \end{array} \quad \begin{array}{c} \downarrow \text{Space} \end{array}$$

Dove i pedici si riferiscono all'antenna utilizzata mentre gli apici si riferiscono all'istante temporale in cui viene trasmesso il simbolo.

L'esempio più noto di applicazione per un codice spazio-tempo è il codice di Alamouti, il quale non prevede che siano inviati i simboli così come sono, ma, come avviene nell'esempio considerato in Figura 6; il flusso di cifre binarie entra

nel modulatore da cui escono i simboli  $s_1$  e  $s_2$  i quali entrano nello Space-Time Encoder. Quest'ultimo invia in successione il simbolo  $s_1$  seguito dal simbolo  $-s_2^*$  all'antenna 1, mentre invia il simbolo  $s_2$  seguito dal simbolo  $s_1^*$  all'antenna 2. Dunque nel primo intervallo temporale l'antenna 1 invierà il simbolo  $s_1$  e l'antenna 2 invierà il simbolo  $s_2$ , mentre nell'istante successivo l'antenna 1 invierà il simbolo  $-s_2^*$  e l'antenna 2 invierà il simbolo  $s_1^*$ . La matrice dei simboli trasmessi che allora ne deriva è la seguente:

$$\begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix}$$

Rispetto al caso in cui si utilizza una sola antenna in trasmissione e in ricezione si ha un aumento della banda poiché vengono trasmessi due simboli di sorgente con due simboli di canale. La ridondanza in questo caso è rappresentata dal fatto che si utilizzano due antenne in trasmissione.

Allora detto  $R$  il vettore dei simboli ricevuti agli istanti 1 e 2 si ha che:

$$\begin{aligned} R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 & w_2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} (h_{11}s_1 + h_{21}s_2 + w_1), & (-h_{11}s_2^* + h_{21}s_1^* + w_2) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

dove i termini moltiplicati per  $h_{12}$  in entrambi gli elementi del vettore ricevuto rappresentano i simboli interferenti sul simbolo utile che nel caso del primo elemento è  $s_1$  e nel caso del secondo elemento è  $s_2$ .

A questo punto va ricavata la variabile di decisione. Per far ciò però invece di considerare il vettore  $R$  si consideri il vettore  $\underline{R} = [r_1 \ -r_2^*]$  e lo si moltiplichi per la matrice di rivelazione

$$\begin{bmatrix} h_{11}^* & h_{21}^* \\ -h_{21} & h_{11} \end{bmatrix}$$

si ottiene allora:

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & -r_2^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_{11}^* & h_{21}^* \\ -h_{21} & h_{11} \end{bmatrix}$$

per brevità si riporta il risultato per la sola  $z_1$  dunque si ha:

$$\begin{aligned} z_1 &= |h_{11}|^2 s_1 + h_{11}^* h_{21} s_2 + h_{11}^* w_1 - h_{21} h_{11}^* s_2 + |h_{21}|^2 s_1 + h_{21} w_2^* = \\ &= s_1 \cdot (|h_{11}|^2 + |h_{21}|^2) + h_{11}^* w_1 + h_{21} w_2^* \end{aligned}$$

si può subito notare che, nel rapporto segnale-rumore il segnale utile viene moltiplicato per il termine quadratico  $(|h_{11}|^2 + |h_{21}|^2)^2$  mentre la potenza di rumore viene moltiplicata per il termine  $(|h_{11}|^2 + |h_{21}|^2)$ . Dunque è grazie all'utilizzo di due antenne in trasmissione che si ha un guadagno di diversità sul SNR pari a 3 dB.

#### 1.5.3.1.2 Antenna Switching

L'obiettivo di questa tecnica non è quello di incrementare la capacità del sistema, bensì quello di migliorare le prestazioni dal punto di vista del tasso di errore in ricezione, dunque si ha un incremento del SNR.

#### 1.5.3.1.3 Maximum Ratio Combinig (MRC)

Maximum Ratio Combining è una tecnica di processing che stima il canale per ciascuna delle antenne e dunque pesa opportunamente il contributo di ciascuna antenna al fine di massimizzare il SNR del segnale complessivo. Tale tecnica consente di ottenere sia un guadagno di diversità e sia un guadagno d'array, ma ha lo svantaggio di non riuscire ad attenuare l'interferenza [5]. È evidente che in ricezione saranno necessarie più antenne, in modo che con ognuna si possano sperimentare diverse condizioni di canale.

Il ricevitore corregge la rotazione di fase dovuta al fading del canale e dunque combina, proporzionalmente all'intensità di ciascun percorso, i vari segnali ricevuti da differenti percorsi. Poiché ciascun percorso sperimenterà differenti attenuazioni, pesando in maniera opportuna i differenti contributi si riesce a massimizzare il rapporto segnale rumore. In particolare i pesi assegnati a ciascun percorso dovranno essere dati in modo tale da amplificare il contributo dei segnali con ampiezza maggiore e attenuare il contributo dei segnali con ampiezza minore. I guadagni complessivi che tipicamente si possono ottenere con ciascuna delle tre tecniche appartenenti agli schemi di diversità sono riassunti nella Tabella 4:

Tecnica	DL/UL	Guadagno (dB)	Implementazione
STC	DL/UL	3 - 5	BS
Antenna Switching	UL	2	CPE
MRC	UL	5	BS



Tabella 4 - Diversity Schemes Gain

source: Airspan

### 1.5.3.2 Adaptive Antenna Systems

Per quanto riguarda l'approccio AAS esso è concettualmente diverso da quello MIMO. Benchè AAS sfrutti un array di antenne come avviene per il MIMO, esso si basa sulla tecnica del beamforming che consiste nell'agire sullo sfasamento e sulla potenza dei segnali sulle varie antenne in modo da controllare e modificare il diagramma di irradiazione. Il fascio generato viene così direzionato verso una determinata CPE. In questo modo il segnale che giunge all'apparato dell'utente su cui è puntato il beam ha una maggiore intensità poiché la sua potenza è concentrata tutta in quella direzione, con una conseguente estensione della copertura. Inoltre l'indirizzamento del fascio porta anche ad una riduzione dell'interferenza che ha come conseguenza un aumento del throughput sperimentato dall'utente.

La tecnica del beamforming può essere operata in modalità fissa o adattativa. Nel caso di modalità fissa i lobi di irradiazione sono fissi, mentre per quanto riguarda la modalità adattativa il lobo è dinamico e insegue l'utente; in questo secondo caso però essendo più complessa la fase di processing i vantaggi dovuti al puntamento del beam si riducono. È possibile inoltre servire più utenti deviando il fascio tra i vari utenti dell'area coperta dalla BS.

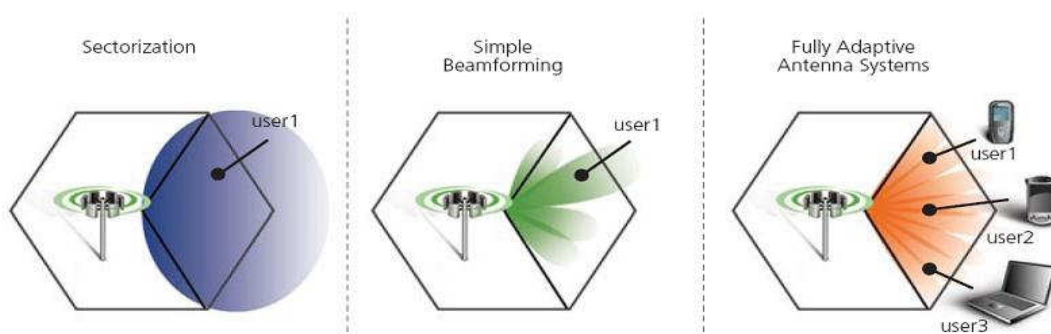


Figura 7 – Tipologie di Beamforming

source: Alvarion

Questo secondo tipo di approccio necessita di una elevata capacità di processing del segnale e di un'elevata tecnologia che sia capace di controllare i segnali di

ciascuna antenna. Le antenne utilizzate inoltre devono essere ben accoppiate e molto ben calibrate.

Rispetto ad un sistema che utilizza una sola antenna, un sistema AAS introduce un guadagno complessivo nel link budget che può variare dai 10 ai 15 dB, riuscendo ad aumentare l'efficienza spettrale netta fino a 4-5 bps/Hz [5].

### **1.5.3.3 Multiple Input Multiple Output (MIMO)**

La tecnica MIMO utilizza antenne multiple per trasmettere segnali paralleli sia lato BS che lato utente e dunque sfrutta la diversità spaziale. I vantaggi che essa introduce sono essenzialmente due: in primo luogo si ha un miglioramento delle prestazioni variabile a seconda del numero di antenne utilizzate (più è alto il numero di antenne utilizzate e maggiore è la capacità); l'altro aspetto vantaggioso è che la tecnica MIMO sfrutta a suo favore gli effetti della propagazione su canale multipath, e dunque un sistema MIMO lavora bene negli ambienti urbani e in generale negli scenari NLOS, poiché in essi il numero di riflessioni è elevato.

Le versioni del MIMO fin qui approvate dal WiMAX Forum sono il MIMO Matrix A e il MIMO Matrix B. Altre versioni sono in via di definizione e rappresentano soluzioni per applicazioni future.

#### **1.5.3.3.1 MIMO Matrix A**

Questa versione del MIMO è basata sullo Space Time Coding. Essa dunque fornisce un guadagno di diversità. Infatti supponiamo di avere due antenne in ricezione; ogni antenna sul trasmettitore, invia il suo flusso informativo, ad entrambe le antenne del ricevitore. In questo modo la potenza del rumore introdotto dal canale risulterà dimezzata, e apportando al link budget un guadagno netto di 3 dB. Naturalmente più è alto il numero di antenne presenti sul ricevitore, e opportunamente distanziate, e maggiore sarà il guadagno di diversità introdotto.

Il MIMO Matrix A riesce a ridurre il Fade Margin di circa 5-6 dB, con una lieve degradazione qualora l'utente fosse mobile.

Il throughput sperimentato dall'utente può essere incrementato, grazie all'utilizzo di modulazioni di ordine superiore, consentito proprio dall'abbassamento del

fading. Questa tecnica non utilizza la multiplazione spaziale, e di conseguenza il miglioramento delle prestazioni è ottenuto principalmente in termini di BER.

Un esempio di sistema MIMO Matrix A può essere quello considerato in Figura 8.

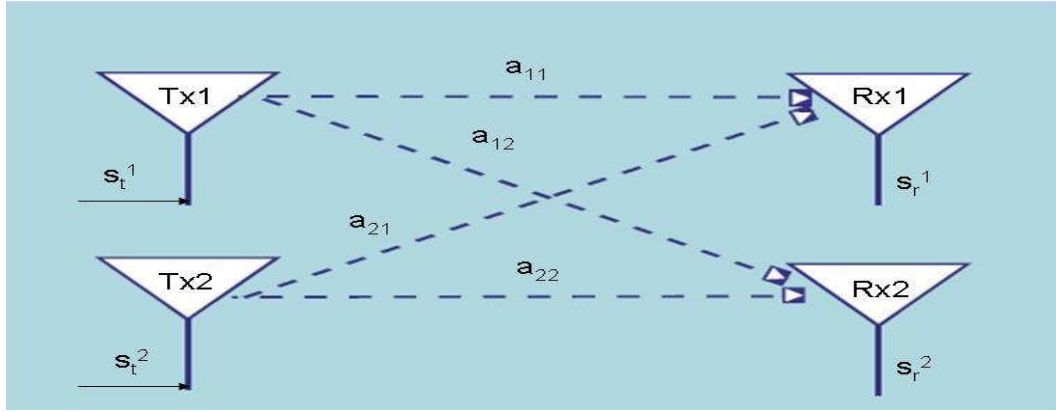


Figura 8 – MIMO Matrix A 2x2

source: Airspan

Consideriamo per semplicità il solo flusso trasmesso dall'antenna 1. All'istante  $t$  viene trasmesso, ad entrambe le antenne in ricezione, il simbolo  $s_t$ .

Il segnali ricevuti dalle due antenne conteranno il contributo del rumore che supponiamo Gaussiano a media nulla e con varianza  $\sigma^2$ . In condizioni ideali, ossia in assenza di fading e filtri di Nyquist perfettamente adattati i simboli ricevuti dalle due antenne saranno:

$$r_t^1 = s_t + w_t^1$$

$$r_t^2 = s_t + w_t^2$$

dove gli apici 1 e 2 si riferiscono all'antenna ricevente e il pedice  $t$  all'istante attuale. In queste condizioni, supponendo di pesare con pesi uguali entrambi i simboli si ricava la variabile di decisione che andrà al decisore:

$$z_t = \frac{1}{2} r_t^1 + \frac{1}{2} r_t^2 = s_t + \frac{w_t^1 + w_t^2}{2} = s_t + w_t$$

si nota subito che la variabile  $w_t$  è ancora una variabile Gaussiana, poiché risultato della combinazione lineare di due variabili aleatorie gaussiane. Essa quindi avrà valor medio pari alla somma dei valori medi, ossia zero, e varianza pari a:

$$\text{var}\{w_t\} = \frac{\sigma^2 + \sigma^2}{4} = \frac{\sigma^2}{2}$$

si nota subito come la varianza del rumore risulti dimezzata rispetto a quella che si otterrebbe nel caso di ricezione con una sola antenna. questo si traduce in un guadagno di diversità netto di 3 dB sul link budget complessivo.

### 1.5.3.3.2 MIMO Matrix B

A differenza del caso precedente, questa tecnica mira ad aumentare il data rate. Questo si ottiene trasmettendo flussi di informazione separati per ciascuna antenna sulla tratta in downlink. Mediante ricevitori particolarmente complessi è così possibile separare i singoli flussi e decodificare i segnali ricevuti. Ad esempio utilizzando due catene di trasmissione/ricezione e le relative antenne sia sulla BS che sull'apparato dell'utente è possibile arrivare quasi a raddoppiare la capacità rispetto al caso in cui si utilizzi una sola antenna. Si esegue in pratica la multiplazione spaziale dei flussi informativi. Dunque se prima le singole antenne trasmettevano gli stessi simboli in intervalli successivi, adesso ogni antenna trasmette una sequenza di simboli senza ripetere ciò che è stato già trasmesso da altre antenne. In Figura 9 si riporta ciò che avviene ad ogni istante nel sistema MIMO Matrix B

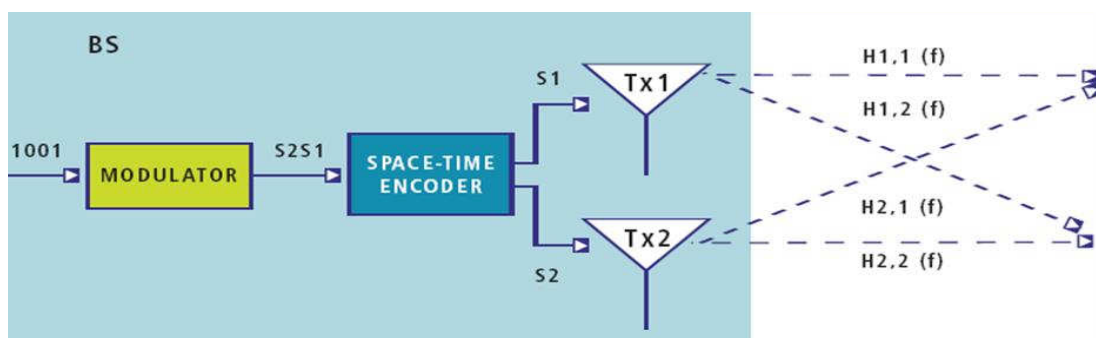


Figura 9 – MIMO Matrix B

source: Airspan

L'incremento teorico che può subire la capacità del sistema qualora esso si basasse su MIMO Matrix B è linearmente dipendente dal numero di antenne utilizzate. Se il sistema utilizza 4 antenne in trasmissione e 4 in ricezione allora la capacità risulta 4 volte quella di un sistema che utilizza una sola antenna per lato.

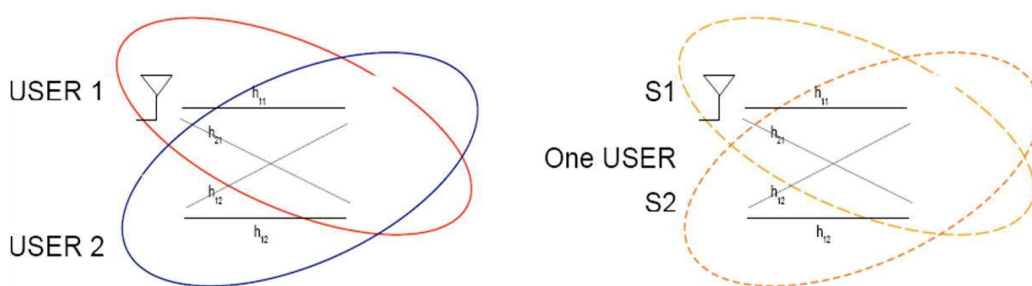
Il guadagno di capacità si può allora esprimere con la seguente espressione:

$$G_c = \min (\text{antenne Tx}, \text{antenne Rx})$$

In realtà il numero di antenne che potranno essere montate su un dispositivo mobile d'utente, costituirà il fattore limitante di tale guadagno, per via degli ovvi problemi di spazio che sorgono nel disporre più antenne su un apparato relativamente piccolo.

### 1.5.3.3 Collaborative MIMO

La tecnica del collaborative MIMO consiste nell'implementare la multiplazione spaziale tra due differenti stazioni mobili, anziché tra due antenne della stessa stazione mobile. Dunque due utenti trasmettono allo stesso tempo e sulla stessa banda frequenziale, dunque la "collaborazione" tra i due flussi d'utente è intesa nel senso che i due trasmettitori devono sincronizzarsi e la loro sovrapposizione è intenzionale e controllata. Se la qualità del segnale così generato è ragionevolmente buona e al ricevitore sono utilizzate almeno due antenne per ricevere il segnale allora è possibile separare i due flussi. La Figura 10 riporta il principio di funzionamento del collaborative MIMO:



**Figura 10 – Differenza tra Collaborative MIMO e MIMO MatrixB**

source: Sequans Communications

I vantaggi introdotti dal collaborative MIMO sono simili a quelli del MIMO Matrix B:

- Incremento della capacità proporzionale al numero di antenne utilizzate. È importante sottolineare che il throughput dell'utente non aumenta
- Viene introdotta una diversità del secondo ordine poiché i dati trasmessi da un utente vengono recapitati da due antenne trasmittenti.

Dunque riassumendo brevemente l'implementazione del MIMO 2x2 su una base station consente di incrementare le prestazioni in downlink. La tecnica dello

Space Time Coding (STC) anche nota come MIMO Matrix A, prevede che i flussi in downstream inviati dalle varie antenne trasmittenti della base station verso il terminale utente siano identici, fornendo in questo modo diversità spaziale e temporale. In uno scenario caratterizzato da un fading rapidamente variabile lo STC incrementa il SNR del segnale ricevuto dal terminale mobile, consentendo così di supportare modulazioni di livelli più elevati e dunque aumentando la capacità in downlink.

L'altra tecnica analizzata è lo Spatial Multiplexing, anche noto come MIMO Matrix B, in cui ciascuna antenna trasmittente della base station invia differenti flussi di dati. Questa tecnica sfrutta il multipath per distinguere tra i differenti data streams e teoricamente, in presenza di opportune condizioni di canale, sarebbe in grado di raddoppiare la capacità del canale in down link.

I maggiori vantaggi da queste due tecniche analizzate si ottengono se il terminale mobile supporta un algoritmo di Adaptive MIMO Switching, capace di selezionare dinamicamente tra Matrix A e Matrix B, a seconda delle condizioni del canale ad ogni istante.

Si è poi parlato del Collaborative MIMO. Questa tecnica viene applicata in uplink. In particolare si osserva un incremento della capacità di canale, poiché la tecnica consiste nel consentire a due terminali utente distinti di trasmettere appunto in modo “collaborativo” nello stesso time slot. L'applicazione delle tecniche MIMO porta benefici soprattutto in scenari urbani e suburbani, in cui è molto più frequente la presenza di multipath.

### **1.5.4 Adaptive Modulation and Coding (AMC)**

Le tecnologie 802.16 implementano l'AMC (Adaptive Modulation and Coding). Questa funzionalità permette di migliorare le prestazioni, ottimizzando sia il throughput che il range di copertura. L'AMC consiste nella scelta dinamica della modulazione e del coding rate per ogni utente a seconda delle condizioni di canale. Se il livello di segnale ricevuto è eccessivamente basso, il sistema è in grado di scegliere automaticamente una modulazione più robusta ma meno efficiente in termini di capacità (QPSK ad esempio) in modo da mantenere il livello di BER pari al target fissato. Qualora invece il livello del segnale ricevuto

sia abbastanza elevato, il sistema opta per modulazioni di ordine maggiore ( 64 QAM ad esempio) mantenendo comunque la BER alla soglia fissata [3].

### 1.5.5 Fractional Frequency Reuse

Poiché nel progetto di una rete, lo spettro rappresenta una risorsa che in nessun modo può essere sprecata, e poiché tipicamente questa risorsa è abbastanza carente, nella tecnologia Mobile WiMAX è previsto l'utilizzo del *Fractional Frequency Reuse* [4]. Tale tecnica permette di suddividere in un certo senso l'utilizzo dello spettro tra il centro della cella e i bordi della stessa. In particolare gli utenti che si trovano al centro della cella possono utilizzare tutti i sottocanalii disponibili, mentre gli utenti che si trovano in prossimità dei bordi delle celle possono utilizzare solo un numero limitato dei canali disponibili. Tale frazione è stabilita in modo da non creare interferenza con la frazione di sottocanalii utilizzata dagli utenti ai bordi delle celle limitrofe. L'obiettivo del FFR è quello di massimizzare l'efficienza spettrale per gli utenti al centro della cella, e contemporaneamente quello di aumentare il throughput e l'intensità del segnale per gli utenti che si trovano più lontani dalla BS. Dunque l'aspetto su cui si basa il FFR è proprio il fatto che un utente che sfrutta la tecnologia Mobile WiMAX trasmette solo su un prefissato numero di sottocanalii e non occupa dunque l'intero spettro a disposizione come invece avviene nelle tecnologie 3G.

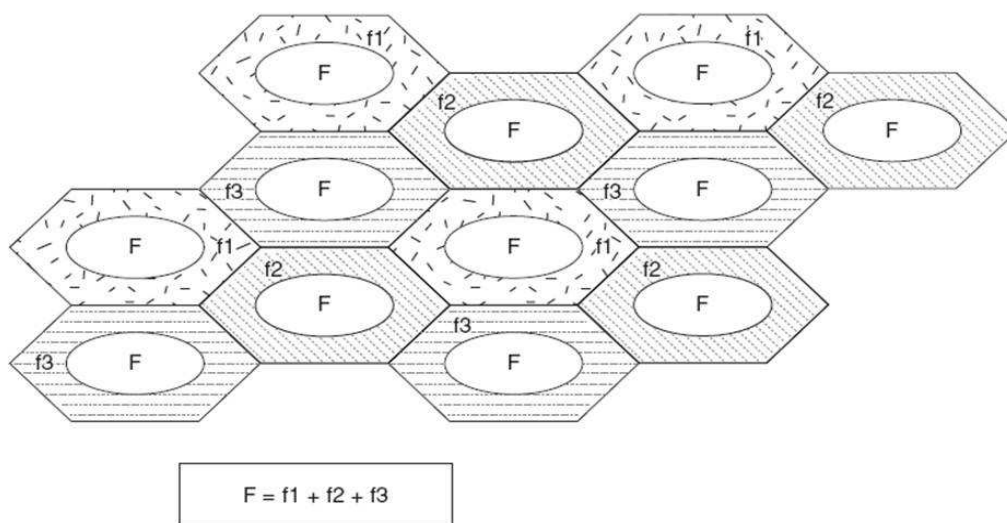


Figura 11 – Fractional Frequency Reuse

source: Fujitsu

Il FFR è implementabile nella sola OFDMA. Inoltre la sua applicazione è resa possibile grazie allo *Zone Switching* per cui è possibile dividere la trama temporalmente in una parte frammentata che utilizza una frazione dei sottocanali a disposizione e in una parte non frammentata.

Lo zone switching insieme alla settorizzazione consente di incrementare notevolmente le prestazioni di rete.

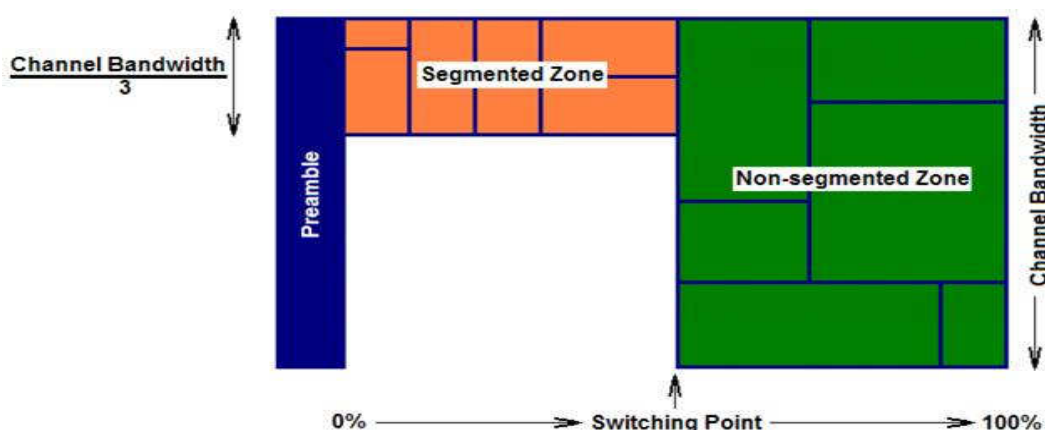


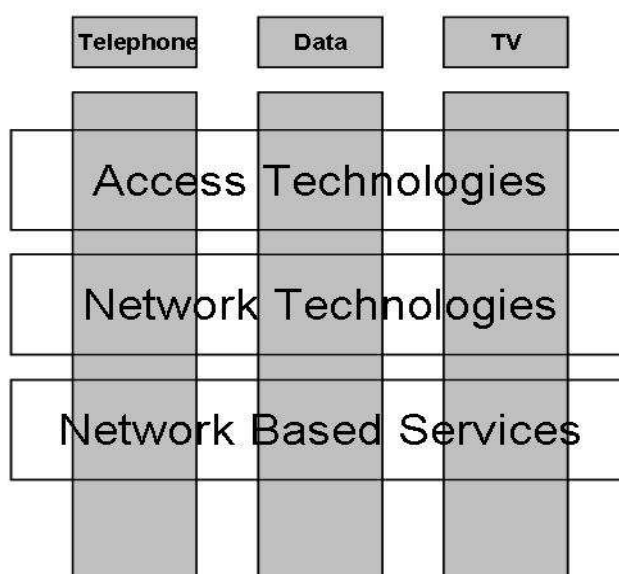
Figura 12 – Zone Switching

source: Witech

## 1.6 Architettura di rete

Ormai già da qualche tempo, si parla sempre di applicazioni IP-Based. In precedenza i servizi di telecomunicazioni tradizionali e i content services erano strutturati secondo una disposizione verticale, riportata in Figura 13, in cui ogni tipologia di servizio aveva una sua tecnologia di accesso, una sua tecnologia di trasporto e dunque una sua architettura di rete:

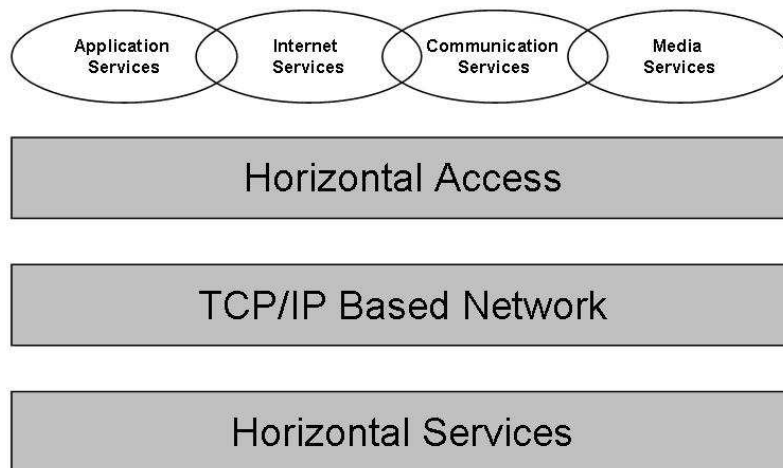




**Figura 13 – Old Vertical Vision of Services**

Ogni servizio aveva una sua rete dedicata, e venivano utilizzati dei terminali adatti solo per una determinata tipologia di servizio. Un semplice esempio di tutto questo è rappresentato dalla suddivisione che esisteva, e in parte esiste ancora, tra la rete telefonica tradizionale, la rete di servizi dati tradizionale e la rete dedicata ai servizi televisivi tradizionale.

Il concetto che sta alla base di una rete Mobile WiMAX predisposta per fornire servizi Personal Broadband, è quello di architettura All-IP. Questo concetto cambia la visione in base alla quale le varie tipologie di servizio si basano su reti distinte. In questo contesto tutti i dispositivi e i servizi risultano compatibili con Internet. Dunque si passa ad una struttura orizzontale dei servizi, in cui tutti si basano su un unico core network, e sfruttano un unico mezzo di comunicazione, che è il pacchetto IP. Dunque si passa da una struttura verticale a una orizzontale come mostrato in Figura 14:



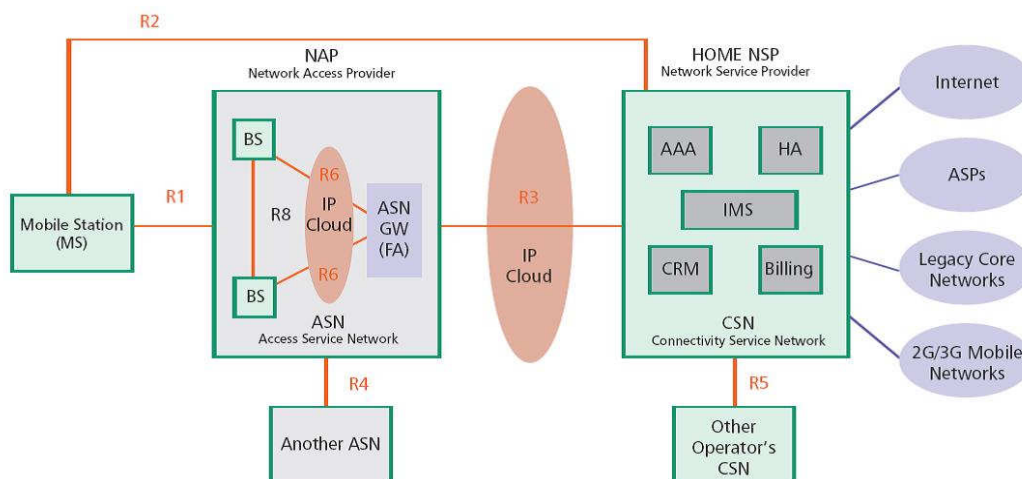
**Figura 14 – New Horizontal Vision of Service**

Cambiano i terminali, i servizi e il modo di gestire i servizi. Se ne ha una dimostrazione andando a considerare la sola rete di accesso. Nella vecchia visione verticale i terminali erano dedicati a un unico servizio corrispondente. Adesso invece si ha la libertà di combinare le funzionalità relative a diversi servizi in un unico terminale. Come si vede dalla Figura 14, i servizi nella nuova concezione orizzontale sono raggruppati in quattro classi:

- *Original Internet Services*: sono i servizi forniti da i vari Internet Service Providers (ISP);
- *Application Services*: sono i servizi forniti dagli Application Service Providers; a questa categoria appartengono servizi bancari e commerciali;
- *Communication Services*: VoIP e Unified Messaging sono due esempi di questa categoria di servizi;
- *Media Services*: Video streaming, Gaming Online etc.

Il vantaggio principale che si trae dall'adottare un'architettura di rete All-IP è dunque evidente e consiste in una sostanziale semplificazione della struttura, che a sua volta comporta una riduzione degli OPEX, di fatto rappresentando una protezione per gli investimenti a lungo termine dell'operatore[16].

La Figura 15 riporta il Network Reference Model di una rete WiMAX:



**Figura 15 – Architettura di rete WiMAX**

Dunque i blocchi costitutivi dell'architettura end-to-end di una rete WiMAX sono essenzialmente tre e sono i dispositivi d'utente (Mobile Stations), l'Access Service Network (ASN) e il Connectivity Service Network (CSN). Si passa ora a descrivere CSN e ASN, mentre il terminale utente merita un discorso a parte.

### 1.6.1 Connectivity Service Network (CSN)

Il CSN è l'entità funzionale preposta a gestire le operazioni della core network mediante protocollo IP; esso è il tramite che permette la comunicazione della rete con le reti di altri operatori.

Le funzionalità assegnate al CSN possono essere riassunte come segue:

- Autorizzazione e accesso layer 3 per gli end-user (IP address allocation, AAA proxy server);
- QoS management (policy e admission control basato sui profili di utente e sugli SLA);
- Supporto alla mobilità basato sul Mobile IP (Home Agent), funzioni per la mobilità tra un ASN e l'altro;
- Tunneling (basato su protocollo IP) con altr entità funzionali (ASN-CSN tunneling, inter-CSN tunneling per il roaming);
- Billing;

- Servizi di rete (accesso Internet, servizi location-based, lawful interception, ecc).;

### 1.6.2 Access Service Network (ASN)

L'altra entità funzionale che costituisce l'architettura della rete di accesso WiMAX è l'Access Service Network, la cui funzione è quella di connettere, mediante link radio, il terminale utente alla rete di backhaul. Come vedremo più avanti, le unità costituenti l'ASN sono l'ASN Getway, che costituisce l'interfaccia tra l'ASN e il CSN, e le Base Stations, atte a collegare il terminale utente con il resto della rete.

Analogamente al CSN si elencano di seguito le funzionalità svolte dall'ASN:

- Network Discovery
- AAA proxy
- Connettività layer 2 in base allo standard 802.16e-2005
- Radio Resource Management
- Multicast e Broadcast Control
- Gestione della mobilità intra-ASN
- Paging e Location Management
- Accounting Assistance
- QoS
- Data Forwarding
- Service Flow Authorization
- Admission Control & Policing

In Figura 15 sono evidenti anche i link che collegano le varie entità funzionali. In letteratura tali link sono denominati Reference Points e a seconda delle unità che essi collegano sono identificati mediante una sigla. I reference points di cui sopra sono:

- R1: reference point tra la Subscriber Unit (SU) e la BS: implementa lo standard IEEE 802.16e-2005 ( o IEEE 802.16-2004 nel caso di applicazioni fisse);

- R2: reference point tra la SU e l'ASN GW o il CSN: è un'interfaccia logica utilizzata per le operazioni di autenticazione, autorizzazione, IP host configuration e gestione della mobilità;
- R3: reference point tra l'ASN e il CSN: da questa interfaccia sono svolte le funzioni di AAA, applicazione delle policy stabilite, e gestione della mobilità. Inoltre mediante questa interfaccia è possibile implementare il tunneling mediante ASN e CSN;
- R4: reference point tra ASN: è utilizzato per gestire la mobilità, e dunque l'handoff, tra i vari ASN;
- R5: reference point tra CSN: utilizzato per la comunicazione tra home e visited network:
- R6: reference point tra BS e ASN: esegue il tunneling tra differenti ASN ed è utilizzato anche per il controllo della segnalazione.

Il WiMAX Forum ha stabilito per l'ASN tre possibili profili di configurazione, ognuno dei quali caratterizzato da una diversa suddivisione delle funzionalità tra BS e ASN Gateway.

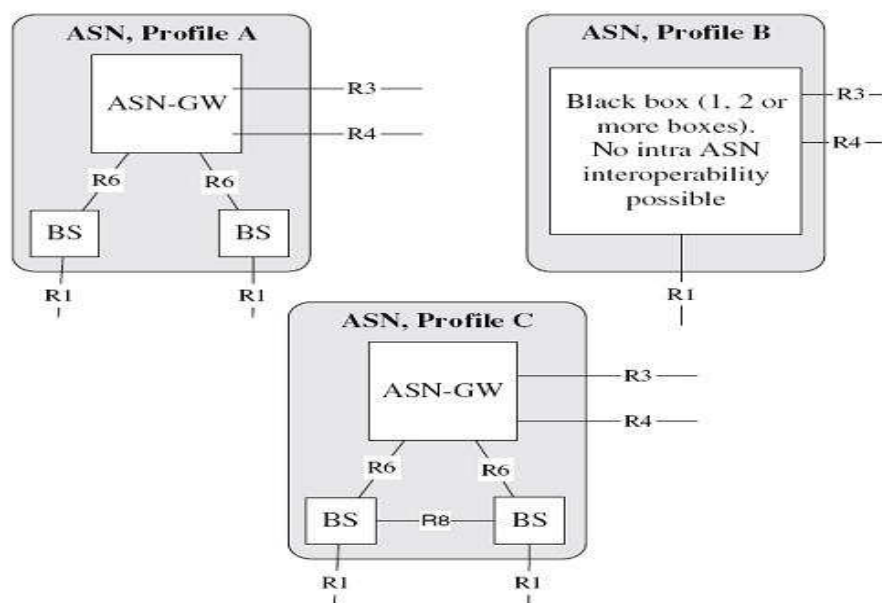


Figura 16 – Profili definiti per l'ASN

Ciò che si può osservare immediatamente è che mentre il profilo A e il profilo C prevedono la suddivisione fisica tra l'ASN Gateway e le BS, il profilo B viene indicato come Black Box e questo per indicare che le funzionalità dell'ASN vengono svolte da un unico dispositivo. I tre profili sono stati definiti per fornire ai vari operatori la possibilità di scegliere in base al deployment di rete scelto.

Si può notare che la soluzione più flessibile è quella rappresentata dal profilo C in quanto esso consente l'interoperabilità, per quanto concerne la segnalazione per la gestione dell'handover e le funzioni di Radio Resource Management (RRM), tra ASN GW e BS di produttori diversi.

I profili A, B e C previsti per l'ASN si distinguono in base alle seguenti specifiche:

➤ Profilo A:

- BS e ASN GW sono entità fisiche differenti, connesse tra loro mediante l'interfaccia R6;
- La funzione di Radio Resource Management (RRM), è suddivisa assegnando la sottofunzione di RRA (Radio Resource Agent) alle BS e di RRC (Radio Resource Controller) all'ASN GW;

➤ Profilo B:

- BS e ASN GW sono integrati nella stessa unità, dunque tutte le funzioni di RRM sono accorpate e svolte da quest'ultima;

➤ Profilo C:

- Si ha la stessa suddivisione presente nel profilo A tranne per il fatto che le funzioni di RRM sono interamente svolte dalle BS.
- In questo profilo sono presenti due ulteriori reference point rispetto a quelli indicati nella Figura 15: R7 che costituisce l'interfaccia preposta al coordinamento tra il piano di controllo e il piano dati all'interno dell'ASN GW; R8 che collega le varie BS dell'ASN, anche qualora queste non appartenessero allo stesso produttore. R8 è utilizzato in tal senso per velocizzare le operazioni di handover tra le varie BS.